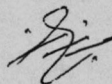


0.784379

На правах рукописи



СОБХ МАЗЕН ИБРАГИМ

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ С СИЛОВЫМИ
ЭЛЕКТРОННЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2010

Работа выполнена на кафедре Электрооборудования Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Афанасьев Анатолий Юрьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Андреев Николай Кузьмич
кандидат технических наук, доцент
Макаров Валерий Геннадьевич

Ведущая организация:

Центр энергосберегающих технологий
Республики Татарстан при кабинете
министров РТ, г. Казань

Защита состоится 18 октября 2010 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.079.06 при Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева по адресу: г. Казань, ул. Толстого, 15 (3-е учебное здание КГТУ), ауд. 225.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим присылать по адресу: 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К.Маркса, 10 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » сентября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.079.06
кандидат технических наук, доцент

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000610284

Б.А.

А.В. Бердников

Актуальность темы. Энергосбережение в настоящее время актуально в связи с истощением природных энергетических ресурсов и с проблемами экологии. В электроприводе энергосбережение возможно путем оптимизации параметров исполнительных двигателей, улучшения режимов работы усилительно-преобразовательных устройств и оптимизации законов управления, применением оптимального управления движением электропривода.

В настоящее время широко применяются электромеханические системы периодического движения, в которых исполнительный двигатель совершает за относительно длительное время основной рабочий ход с малым динамическим моментом. За относительно короткое время он возвращается в начальное положение с большим динамическим моментом. Эти системы используются в оптических системах сканирования, в станках с возвратно-поступательным движением, в промышленных роботах и другом технологическом оборудовании.

В современных электромеханических системах с периодическим движением используются электроприводы с моментными двигателями с постоянными магнитами, двигатели постоянного тока электромагнитного возбуждения или с возбуждением от постоянных магнитов, синхронные двигатели. Снизить энергозатраты в электромеханических системах с периодическим движением возможно путем использования оптимального управления по критерию минимума мощности потерь в обмотках двигателя и мощности, потребляемой от сети.

Важную роль в автоматизированном электроприводе играют устройства идентификации параметров в режиме нормального функционирования, позволяющие адаптировать оптимальное управление при изменении этих параметров от температуры и других факторов.

В настоящее время для питания электроприводов на основе частотно-управляемых синхронных и асинхронных двигателей используют электронные преобразователи частоты (ПЧ), обеспечивающие экономичное и плавное регулирование в продолжительных и переходных режимах работы электроприводов. Наиболее удачной принятой в мире компоновкой ПЧ является структура со звеном постоянного тока, формирование выходных сигналов в которой осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Применение ШИМ резко повышает КПД электропривода. Но появляются дополнительные потери в двигателе из-за пульсации токов и магнитных потоков на частоте ШИМ, которые необходимо минимизировать.

Таким образом, задачи оптимального управления двигателем по критерию минимума мощности потерь в обмотках двигателя в системах периодического движения, идентификации параметров двигателя постоянного тока и синхронного двигателя, минимизации мощности потерь на частоте ШИМ в трехфазных двигателях и в преобразователях частоты являются актуальными.

Объект исследования – электроприводы с двигателями постоянного тока и с бесконтактными моментными двигателями, преобразователи частоты с трехфазной активно-индуктивной нагрузкой.

Предмет исследования – законы управления сканирующим электроприводом, идентификация параметров электродвигателей, процессы в преобразователе частоты с трехфазной активно-индуктивной нагрузкой.

Цель научного исследования – энергосбережение в электроприводах периодического движения с силовыми электронными преобразователями.

Для достижения цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи.

1. Поиск оптимального управления электроприводом с различными типами двигателей (моментные двигатели, двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов) по критерию минимума мощности потерь в обмотке двигателя и по критерию минимума мощности, потребляемой от сети.

2. Поиск оптимального управления электроприводом с двигателем постоянного тока независимого возбуждения без учета и с учетом нелинейности магнитопровода по критерию минимума мощности потерь в обмотках двигателя.

3. Разработка устройств идентификации параметров моментного двигателя, двигателя постоянного тока и параметров синхронного двигателя.

4. Поиск оптимального закона управления потенциалом нейтрали по условию минимума мощности потерь в трехфазной нагрузке ПЧ, возникающих от пульсаций токов на частоте ШИМ.

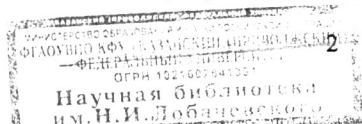
5. Исследование зависимости суммарной мощности, потребляемой преобразователем частоты и нагрузкой от источника питания, от частоты ШИМ и определение оптимальной частоты ШИМ по критерию минимума этой мощности.

Методы исследования. В диссертационной работе применены аналитические методы теории обобщенных электрических машин, теории оптимального управления, численные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений, методы математического программирования, экспериментальные исследования. При создании математической модели и при моделировании использовались программные пакеты MatLab.7, TurboPascal и стандартная среда программирования микроконтроллеров MPLAB IDE.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением классических исходных уравнений электрических машин и электропривода, точными аналитическими преобразованиями теории обобщенных машин и традиционными методиками расчета при номинальных параметрах, использованием теории рядов Фурье, применением современных компьютерных средств и программных комплексов, экспериментальным подтверждением адекватности результатов, полученных аналитическими и численными методами.

Научная новизна работы заключается в алгоритмах управления электроприводами периодического движения, в принципах идентификации параметров двигателя постоянного тока и синхронного двигателя, в формулах корректирующего напряжения для трехфазного ПЧ, в формуле расчета мощности потерь в ключах ПЧ с ШИМ, в формулах расчета мощности потерь в стали электродвигателя от вихревых токов и от гистерезиса на частоте ШИМ.

Практическая ценность работы состоит в возможности поиска оптимального управления электроприводом с помощью разработанных программ, в



функциональных схемах устройств идентификации параметров, в программах поиска оптимальных законов изменения потенциала нейтрали, в полученных формулах для управления потенциалом нейтрали, в программе для микроконтроллера для формирования оптимального сигнала коррекции.

Реализация результатов работы была проведена в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы "Разработка научных основ создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления электроэнергии" и в учебном процессе в дисциплинах "Автоматизированный электропривод", "Электроприводные системы", "Вторичные источники питания".

Новые научные положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритмы оптимального управления двигателями постоянного тока в системах периодического движения по критерию минимума мощности потерь.

2. Функциональные схемы идентификации параметров двигателя постоянного тока и синхронного двигателя.

3. Функциональная схема усилителя неуравновешенной системы трехфазных напряжений.

4. Формулы для сигнала коррекции при минимизации мощности потерь от пульсации токов на частоте ШИМ в активно-индуктивной нагрузке ПЧ.

5. Экспериментальная формула для расчета мощности потерь в системе "ПЧ – асинхронный двигатель" в зависимости от частоты ШИМ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на V Междунар. н/п конф. «Автомобиль и техносфера» в г. Казани, 2007 г., на XX, XXI и XXII Всерос. межвуз. н/т конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы ...» в г. Казани, 2008, 2009 и 2010 г., на Междунар. н/п конф. «Современные технологии» в г. Казани, 2008 г., на Всерос. семинаре «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением» в г. Казани, 2008 г., на IX и X Междунар. симпоз. «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» в г. Казани, 2008, 2009 г., на V Всерос. н/т конф. «Проблемы и перспективы развития авиации ...» в г. Казани, 2009 г., на II Всерос. н/т конф. «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» в г. Уфе, 2009 г., на XXXIX Междунар. н/п конф. «Повышение эффективности электрического хозяйства ...» в г. Москве, 2009 г., на Межвуз. регион. студ. н/п конф. «Новые направления и современные тенденции развития автоматизированных систем управления» в г. Нижнекамске, 2010 г., на Всерос. н/п конф. «Проблемы перехода к устойчивому развитию ...» в г. Нижнекамске, 2010 г., на Междунар. молодеж. науч. конф. «XVIII Тупольские чтения» в г. Казани, 2010 г.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 21 печатной работе (в 2 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, в 2 патентах на изобретения Российской Федерации и в 17 трудах конференций).

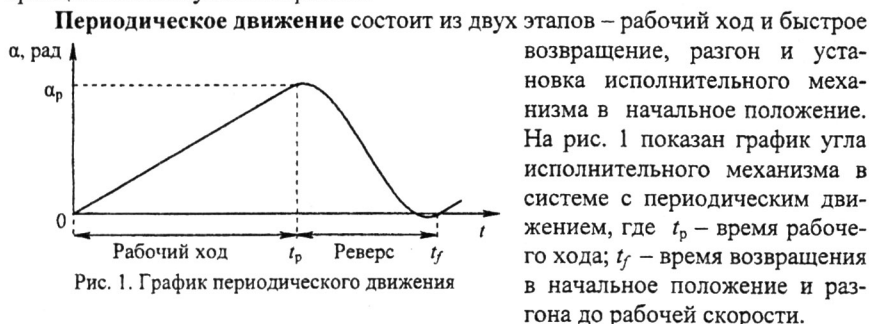
Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 172 страницы, в том числе 156 страниц основного текста, 90 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 125 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дана информация о структуре и объеме диссертации.

В первой главе приводится обзор литературы по вопросу энергосбережения в системах периодического движения, дано обоснование решаемой научной задачи. Подробно освещены вопросы оптимального управления электроприводами. Отмечено, что наиболее перспективным методом является принцип максимума Л.С. Понтрягина. Представлена классификация и основные схемотехнические решения современных ПЧ и их применение с учетом их достоинств и недостатков. Названы пути энергосбережения: оптимизация параметров исполнительных двигателей, режимов работы усилительно-преобразовательных устройств и оптимальное управление процессами в электроприводах. В результате были сформулированы основные задачи диссертации и выбраны методы их решения.

Во второй главе решаются задачи оптимального управления электроприводом периодического движения по критерию энергопотребления методом принципа максимума Понтрягина.



В качестве исполнительных двигателей в системах, осуществляющих периодическое движение, широко используются как моментные двигатели, так и двигатели постоянного тока. Их математическая модель имеет вид:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega; \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(ci - M_c); \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(u - ri - c\omega), \quad (1)$$

где α – угол поворота вала двигателя; ω – частота вращения вала; i – управляющий ток двигателя; M_c , J – момент нагрузки и момент инерции вращающихся частей, приведенные к валу двигателя; u – управляющее напряжение двигателя; L , r – индуктивность и сопротивление цепи, обтекаемой управляющим током; c – конструктивный коэффициент ЭДС и момента.

При моменте сопротивления движению $M_c = M_m \text{sign}(\omega)$ требуется найти оптимальный закон движения на обратном ходе, чтобы энергия потерь в обмотке была минимальной при наличии ограничения на управление $-U_m \leq u \leq U_m$

с начальными условиями $\alpha = \alpha_p$; $\omega = \omega_p$; $i = i_p$ и конечными условиями $\alpha = 0$; $\omega = \omega_p$; $i = i_p$, где критерий оптимизации $F = \int_{t_p}^{t_f} ri^2 dt \Rightarrow \min$.

При условиях (1): $L = 0$, $M_c = \text{const}$ известно, что на обратном ходе ток должен изменяться по линейному закону, скорость вращения – по квадратичному закону, а угол поворота ротора – по закону полинома третьей степени. Отметим, что при периодическом движении ток обмотки двигателя должен два раза измениться скачком в сторону уменьшения. В реальных системах и при ограничении на напряжение ток не может измениться скачком.

При условиях (2): $L = 0$, $M_c = M_m \cdot \text{sign}(\omega)$ показано, что угловая скорость переходит два раза через нуль на обратном ходе и что в моменты перехода ток изменяется скачком в сторону компенсации изменения статического момента.

При условиях (3): $L \neq 0$, $M_c = \text{const}$, $|u| \leq U_m$ из-за наличия индуктивности обмотки ток не может измениться скачком в момент окончания рабочего хода. Получено, что существуют интервалы времени (t_p, t_1) и (t_2, t_f) , на которых ток изменяется в сторону уменьшения с управлением $u = -U_m$, длительности

этих интервалов определяются значением U_m . На интервале времени (t_1, t_2) идет особое управление по закону $i(t) = At + B$ (см. рис. 2). Здесь система дифференциальных уравнений третьего порядка интегрировалась методом Рунге-Кутты с постоянным шагом, а моменты времени t_1, t_2 и константа A определяются методом Ньютона (методом касательных) с симметричной вариацией искомых величин.

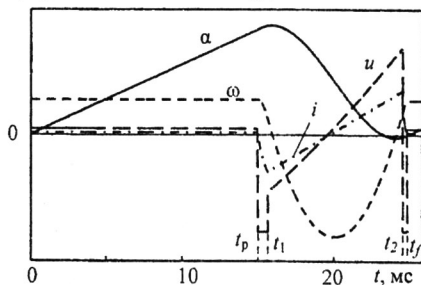


Рис. 2. Графики u, i, ω, α при условиях(3)

При условиях (4): $L \neq 0$, $M_c = M_m \cdot \text{sign}(\omega)$, $|u| \leq U_m$ и одним переходом скорости вращения ω через нуль с положительным ускорением получено, что оптимальное управление в основном является особым, но имеется интервал времени, охватывающий момент перехода скорости через нуль, с предельным управлением $u = -U_m$ для компенсации изменения момента сопротивления.

При основной задаче (5): $L \neq 0$, $M_c = M_m \cdot \text{sign}(\omega)$, $|u| \leq U_m$ получено, что оптимальное управление на обратном ходе состоит из семи этапов (см. рис. 3).

1. Управление $u = -U_m$ на интервале (t_p, t_1) при переходе от рабочего хода на реверс, на интервале (t_8, t_f) при обратном переходе и на интервале (t_2, t_4) , охватывающем момент t_3 перехода угловой скорости через нуль с отрицательным ускорением.

2. Управление $u = U_m$ на интервале (t_5, t_7) , охватывающем момент t_6 перехода угловой скорости через нуль с положительным ускорением.

3. Особое управление на интервалах (t_1, t_2) и (t_7, t_8) с током $i(t) = At + B + m$, и на интервале (t_4, t_5) с током $i(t) = At + B - m$; $m = M_m/J$.

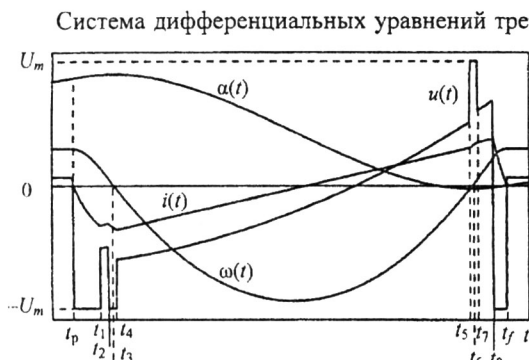


Рис. 3. Графики u , i , ω , α при основной задаче

методом Рунге-Кутты с постоянным шагом. Моменты времени t_1 , t_8 и коэффициент A определялись численным методом Ньютона с симметричной вариацией искомых величин исходя из конечных условий. Моменты времени t_2 , t_4 , t_5 , t_7 определялись градиентным методом при оптимизации энергии потерь.

Полученная качественная структура оптимального

управления при периодическом движении по критерию минимума энергии потерь в обмотке сохраняется при любых параметрах электропривода. Для каждого электропривода изменяются лишь величины t_1 , ..., t_8 и A в зависимости от его параметров.

Была решена задача оптимального управления двигателем без учета индуктивности обмотки по критерию минимума потребляемой от сети мощности. Оптимальное управление состоит из трех этапов (см. рис. 4). Было показано, что минимумы энергии потерь в двигателе и энергии, потребляемой от сети, достигаются при разных управлениях.

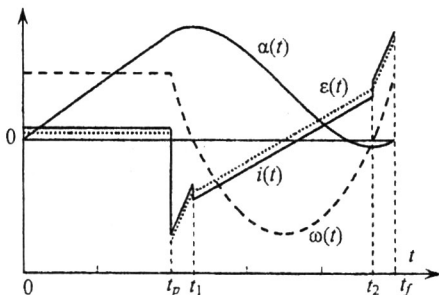


Рис. 4. Оптимальное управление при минимизации потребляемой мощности от сети

Была рассмотрена задача оптимального управления электроприводом постоянного тока в технологическом процессе с периодическим движением деталей на рабочем станке по критерию минимума мощности потерь в двигателе при условиях ограниченных ресурсов. Показано, что оптимальное управление экономит энергию на 25% сравнительно с управлением постоянным по модулю угловым ускорением. Переход на оптимальное управление обеспечивает ограничение температуры двигателя и удовлетворение динамических ограничений.

Была рассмотрена задача оптимального управления в системе сканирования, где система вращает малоразмерный оптический элемент (зеркальце) с постоянной угловой скоростью на рабочий угол. Показано, что эта задача совпадает с задачей (3), поскольку система совершает инерционное колебательное движение.

В третьей главе решена задача оптимального управления электродвигателем постоянного тока с независимым возбуждением в системе периодического

движения без учета и с учетом нелинейности магнитопровода. Показано, что минимум потерь в двигателе без учета нелинейности магнитопровода достигается при обеспечении определенного соотношения между токами и сопротивлениями обмоток якоря и возбуждения. Тогда мощность потерь в обмотках пропорциональна электромагнитному моменту и оптимальные законы движения имеют вид, показанный на рис. 5.

Для учета нелинейности кривой намагничивания $\Phi = f(i_f)$, можно воспользоваться выражением

$$\Phi = bi_f - d\sqrt{(i_f - i_{f0})^2 + a^2} + d\sqrt{i_{f0}^2 + a^2}, \quad \text{где } a, b, d, i_{f0} - \text{константы.}$$

Методом множителей Лагранжа было найдено соотношение токов i_f, i_a , создающих требуемый момент при условии минимума мощности потерь:

$$P = r_a i_a^2 + r_f i_f^2 \Rightarrow \min; \quad M_3 = c\Phi i_a = M^0. \quad V = r_a i_a^2 + r_f i_f^2 + \lambda(c\Phi i_a - M^0) \Rightarrow \text{stat.}$$

Следовательно, мощность потерь в обмотках определяется как функция от электромагнитного момента, т.е. $p = p(M_3)$, и условие максимума гамильтониана сведено к условию

$$\tilde{H} = -p(M_3) + \gamma M_3 \Rightarrow \max_{M_3}. \quad (2)$$

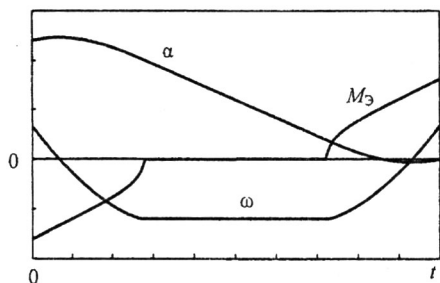


Рис. 6. Оптимальное движение при $\Phi = f(i_f)$

магнитный момент равен нулю.

Данный метод позволяет решить ряд задач оптимизации. Например, в следующей системе с уравнениями $\dot{x}_1 = x_2$; $\dot{x}_2 = (M_3 - M_c - kx_2)/J$; $x_1 = \alpha$; $x_2 = \omega$, где M_c – статический момент исполнительного механизма; k – коэффициент момента вязкого трения. Требуется, чтобы интеграл от суммы мощности потерь в обмотках двигателя и квадрата угла был минимальным:

$$F = \int_{t_p}^{t_f} (r_a i_a^2 + r_f i_f^2 + \lambda \alpha^2) dt \Rightarrow \min, \quad \text{где } \lambda - \text{весовой коэффициент.}$$

Здесь условие максимума гамильтониана совпадает с условием (2). Поиск

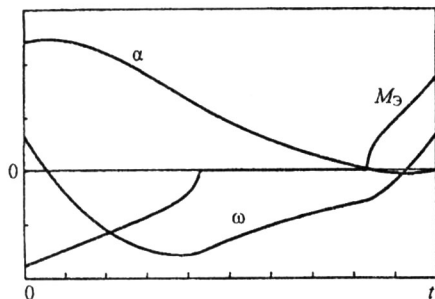


Рис. 7. Оптимальное движение в следящей системе

оптимальных законов движения возможен по алгоритму, предложенному в предыдущем пункте. Результаты показаны на рис. 7.

В четвертой главе решена задача идентификации параметров двигателя постоянного тока градиентным методом с помощью уравнений баланса напряжений и баланса моментов. Решена задача идентификации параметров синхронного двигателя с помощью уравнений баланса напряжений и баланса моментов в осях $d -$

q , известных в теории обобщенных электрических машин. Проведенное моделирование подтвердило их работоспособность и эффективность.

Для двигателя постоянного тока (ДПТ) и для моментного двигателя уравнения баланса напряжений и баланса моментов имеют вид:

$$u_0 = r_0 i + L_0 i' + c_0 \omega; \quad c_0 i = J_0 \omega' + M_0.$$

Индекс $(_0)$ обозначает истинные значения параметров, $(')$ означает производную по времени. Оценки параметров обозначены буквами без индексов – r , L , c , J , M . Оценки в произвольный момент времени отличаются от истинных значений. Поэтому имеются невязки

$$\Delta u = r i + L i' + c \omega - u_0; \quad \Delta M = J \omega' + M - c i,$$

которые в процессе идентификации должны стремиться к нулю. Введены две функции невязок $V_u = (\Delta u)^2/2$; $V_M = (\Delta M)^2/2$.

Согласно градиентному методу оптимизации, где скорость изменения оценки параметра пропорциональна частной производной от функции невязки по этому параметру, была построена функциональная схема устройства идентификации параметров электродвигателя постоянного тока [9]. При моделировании процесса идентификации были приняты следующие истинные значения параметров: $r_0 = 0,9$ Ом; $L_0 = 0,2$ Гн; $c_0 = 2$ В·с; $J_0 = 1,1$ кг·м²; $M_0 = 1,5$ Н·м. Напряжение $u_0 = 5 + 10 \sin(t)$. На рис. 8, а приведены графики изменений параметров в процессе идентификации сигналов при произвольных начальных условиях. На рис. 8, б приведены фазовые траектории на плоскости $J - M$ при различных сочетаниях начальных значений этих параметров.

Устойчивость процесса идентификации была установлена с помощью функций Ляпунова

$$F_u = \frac{(r - r_0)^2}{2\mu_r} + \frac{(L - L_0)^2}{2\mu_L} + \frac{(c - c_0)^2}{2\mu_c}; \quad F_M = \frac{(J - J_0)^2}{2\mu_J} + \frac{(M - M_0)^2}{2\mu_M},$$

где μ_r , μ_L , μ_c , μ_J , μ_M – положительные коэффициенты.

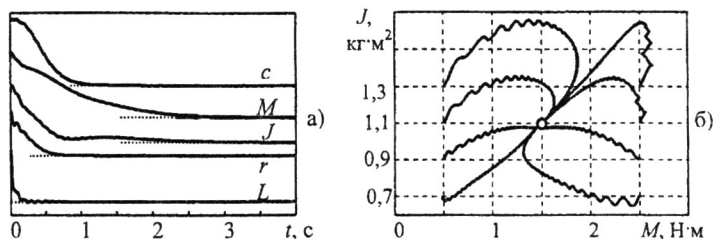


Рис. 8. Процесс идентификации параметров ДПТ

Для синхронного двигателя (СД) имеются невязки уравнений

$$\Delta u_d = r i_d' + L_d i_d' - \omega L_q i_q - u_{d0}; \quad \Delta u_q = r i_q + L_q i_q' + \omega(\Psi + L_d i_d) - u_{q0};$$

$$\Delta M = J \omega' + p M - p^2 i_q (\Psi + i_d (L_d - L_q)),$$

где u_d, u_q – напряжения продольной и поперечной фаз обобщенной машины; i_d, i_q – токи этих фаз; L_d, L_q – индуктивности фаз; r – их активное сопротивление; Ψ – амплитуда потокоцепления фазы обмотки якоря с магнитным потоком ротора-индуктора; J – момент инерции подвижных частей; p – число пар полюсов; M – статический момент нагрузки; ω – частота вращения ротора, эл.рад/с.

Введены функции невязок: $V_d = (\Delta u_d)^2 / 2$; $V_q = (\Delta u_q)^2 / 2$; $V_M = (\Delta M)^2 / 2$.

Согласно градиентному методу была построена функциональная схема устройства идентификации параметров синхронного двигателя, ее работоспособность и эффективность подтверждены моделированием. На рис. 9, а приведены графики сигналов $r(t)$, $L(t)$, $c(t)$, $J(t)$ и $M(t)$ в относительных единицах при произвольных начальных условиях. На рис. 9, б приведены фазовые траектории на плоскости $\Psi - L_q$ при различных сочетаниях их начальных значений. Методом анализа устойчивости с помощью функций Ляпунова показано, что система обеспечивает устойчивость движения.

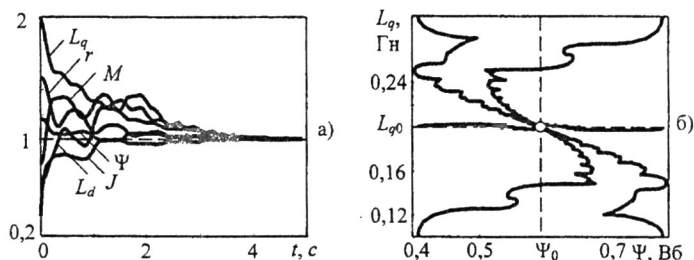


Рис. 9. Процесс идентификации параметров СД

В пятой главе проводится оптимизация режимов работы трехфазных преобразователей частоты с активно-индуктивной нагрузкой.

Важным параметром ПЧ является коэффициент использования напряжения питания (или область линейности). Разработана функциональная схема усилителя неуравновешенной системы напряжений [15], которая имеет

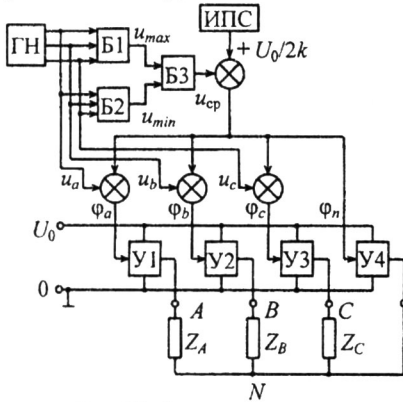


Рис. 10. Функциональная схема трехфазного усилителя

расширенную зону линейности выходных напряжений (см. рис. 10). Она содержит генератор ГН задающих напряжений u_a, u_b, u_c , 4 однофазных усилителя $Y1 - Y4$ с коэффициентом усиления k , блоки максимального и минимального значений $B1, B2$, блок среднего значения $B3$, 4 сумматора, источник постоянного сигнала ИПС.

В примере $U_0 = 200 \text{ В}$; $U_{3m} = 1,15 \text{ В}$;

$$u_a = U_{3m} \sin \omega t - 0,4 \sin 3\omega t;$$

$$u_b = U_{3m} \sin(\omega t - 2\pi/3) - 0,4 \sin 3\omega t;$$

$$u_c = U_{3m} \sin(\omega t - 4\pi/3) - 0,4 \sin 3\omega t.$$

Потенциалы $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_N$ и напряжения на фазах показаны на рис. 11. Видно, что максимальное и минимальное значения

потенциалов $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ симметрично расположены относительно $U_0/2 = 100 \text{ В}$.

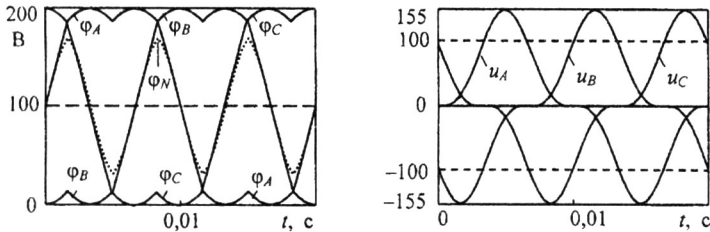


Рис. 11. Потенциалы и напряжения на фазах

Получена неуравновешенная система напряжений с амплитудой 155 В при питании от источника с напряжением 200 В.

Минимизация мощности потерь в нагрузке по первой гармонике ШИМ возможна управлением потенциалом нейтрали. Классическая функциональная схема ПЧ с ШИМ показана на рис. 12 и содержит генератор ГН задающих напряжений u_a, u_b, u_c с амплитудой U_{3m} , генератор ГПН пилообразного напряжения u_n , три компаратора К, три инвертора И, драйвер Д, блок силовых ключей БСК ($A1 - A6$), питаемых от источника постоянного напряжения U_0 . A, B, C – зажимы ПЧ – соединены с трехфазной активно-индуктивной нагрузкой Z_A, Z_B, Z_C с изолированной нейтралью N . Требуемые напряжения и потенциалы $u_A = U_m \sin \omega_n t$; $u_B = U_m \sin(\omega_n t - 2\pi/3)$; $u_C = U_m \sin(\omega_n t - 4\pi/3)$; $\varphi_N = (\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C)/3$; $\varphi_A = u_A + \varphi_N$; $\varphi_B = u_B + \varphi_N$; $\varphi_C = u_C + \varphi_N$.

На одном периоде ШИМ мгновенные потенциалы на зажимах ПЧ $\bar{\varphi}_A, \bar{\varphi}_B, \bar{\varphi}_C$ имеют вид прямоугольных импульсов, а потенциал нейтрали $\bar{\varphi}_N$ и

напряжения на фазах $\bar{u}_A, \bar{u}_B, \bar{u}_C$ – кусочно-постоянные функции. Поэтому при ШИМ на выходе ПЧ получаются требуемые напряжения u_A, u_B, u_C , пропорциональные задающим сигналам с коэффициентом усиления k , и совокупность напряжений (с частотой ШИМ и высшие гармоники), которые вызывают в нагрузке пульсации токов, увеличивающие в ней мощность потерь.

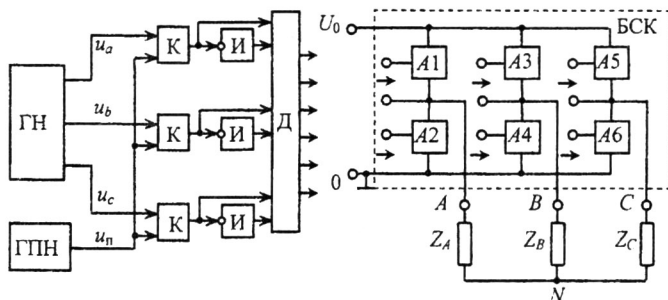


Рис. 12. Классическая функциональная схема ПЧ с ШИМ

Частота ШИМ намного превышает частоту выходного напряжения f_n , поэтому можно считать, что среднее значение мгновенного напряжения и мгновенного потенциала на каждой фазе за каждый период ШИМ равно требуемому напряжению в момент времени t_k , где t_k – время середины k -го импульса на периоде ШИМ. Приняты допущения: а) каждый импульс напряжения имеет локальный ряд Фурье в результате продолжения импульса периодической функцией; б) середины импульсов напряжения на выходах ПЧ совпадают по времени и удалены на время периода импульсов T ; в) оценка мощности потерь в нагрузке определяется первой гармоникой на частоте импульсов. Было получено, что первая гармоника потенциала на каждом выходе ПЧ и потенциала нейтрали по локальному ряду Фурье равны

$$\varphi_{j1} = (2U_0 / \pi) \sin(\gamma_j \pi) \cos \omega t = \varphi_{j1m} \cos \omega t;$$

$$\varphi_{N1} = (2U_0 / 3\pi) \cdot \sum_j \sin(\gamma_j \pi) \cdot \cos(\omega t) = \varphi_{N1m} \cos(\omega t),$$

где j – индекс фазы A, B, C ; γ_j – относительная длительность импульсов.

На рис. 13, а показаны потенциалы для фазы A и на рис. 13, б эквивалентная схема замещения "ПЧ – нагрузка" для первой гармоники.

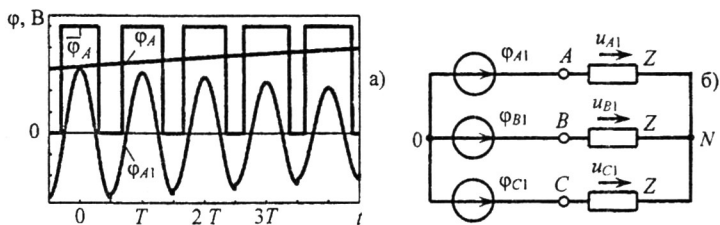


Рис. 13. Потенциалы фазы A и схема замещения "ПЧ – нагрузка"

Минимум мощности потерь в нагрузке достигается при условии

$$\varphi_N = U_0/2 + u_K, \quad u_K = \frac{U_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(- \frac{\sum_j (\sin(2\frac{u_j}{U_0}\pi) + \sin(\frac{u_j}{U_0}\pi))}{\sum_j (\cos(2\frac{u_j}{U_0}\pi) - \cos(\frac{u_j}{U_0}\pi))} \right)$$

Анализ показал, что оптимальный сигнал коррекции изменяется по периодическому закону с периодом, равным трети выходного периода, и с амплитудой, равной четверти амплитуды выходного напряжения, и при малых амплитудах он совпадает с формулой $u_K(t) = \frac{1}{4}U_m \sin(3\omega_n t)$.

Результаты расчета показаны на рис. 14. Видно, что иногда мощность потерь в нагрузке по первой гармонике p равна нулю. Показано, что коррекция снижает среднее значение мощности потерь в нагрузке на частоте ШИМ на 48% сравнительно с постоянным потенциалом нейтрали.

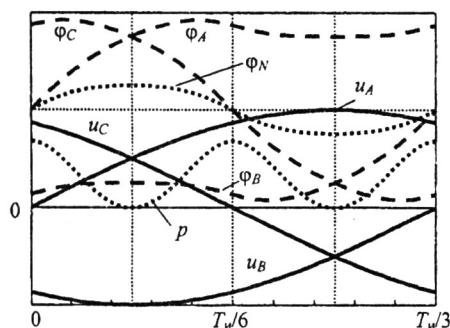


Рис. 14. Потенциалы, напряжения и мгновенная мощность потерь

Решена задача минимизации мощности потерь в нагрузке управлением потенциалом нейтрали по результирующему току. Мгновенная мощность потерь в обмотке двигателя

$$p(t) = r_n \sum_{j=A,B,C} i_j^2(t).$$

Мгновенное значение тока каждой фазы определяется уравнением

$$di_j/dt = (\bar{\varphi}_j - r_n i_j - e_j - \bar{\varphi}_N)/L_n, \quad (j = A, B, C), \quad (3)$$

где e_j – ЭДС фазы j ; r_n, L_n – сопротивление и индуктивность фазы обмотки.

Минимизация мощности потерь в нагрузке сводится к минимизации по напряжению коррекции u_K интеграла

$$\int_{t_k - T/2}^{t_k + T/2} (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2) dt, \quad \kappa = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

Разработан алгоритм моделирования и расчета средней мощности потерь в обмотке двигателя за один период ШИМ. Моменты переключений определены методом Ньютона. Для расчета фазных токов и средней мощности потерь в нагрузке по формулам (3) и (4) применен численный метод Рунге-Кутты. Для точного решения системы дифференциальных уравнений при скачкообразном изменении напряжений в моменты переключений, количество шагов N и шаг интегрирования $h_{n,i}$ на каждом интервале определяются формулами

$$N = \operatorname{int}\left(\frac{t_{i+1} - t_i}{h_0}\right) + 1; \quad h_{n,i} = \frac{t_{i+1} - t_i}{N},$$

где $i = 0, \dots, 6$; h_0 – базовый шаг интегрирования.

С целью повышения точности расчета средней мощности потерь на каждом периоде ШИМ фиксировалось время импульса на этом периоде, т.е. для k -го периода фиксировались задающие сигналы и решалась система дифференциальных уравнений в течение n_0 периодов ШИМ. В результате средняя мощность потерь за период ШИМ будет равна среднему установившемуся значению. Кроме того, в программе идет и расчет мощности потерь в нагрузке, если вместо ШИМ используется линейный трехфазный усилитель, для сравнения полученных результатов и определения, насколько ШИМ повышает мощность потерь. В результате расчетов по данному алгоритму было построено семейство графиков (см. рис. 15). Оно показывает, как изменяется приращение средней мощности потерь в нагрузке в функции от u_k в различные моменты времени t_k . За нулевой уровень принята мощность потерь без коррекции, оптимальные значения $u_{ко}$ показаны на рисунке кружками. Видно, что оптимальный сигнал коррекции изменяется по закону

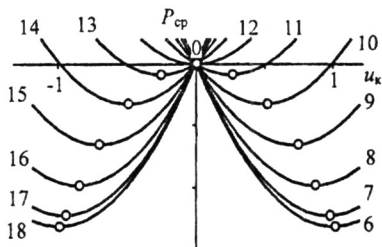


Рис. 15. Средняя мощность потерь в нагрузке в функции от u_k .

$$u_{ко}(t) = \frac{U_{3m}}{4} \sin(3\omega_n t). \quad (5)$$

Показано на примере, что с коррекцией средняя мощность потерь в нагрузке от ШИМ снизилась на 33% сравнительно с мощностью потерь без коррекции. Показано, что если u_a, u_b, u_c формируют трехфазную синусоидальную систему напряжений или любую трехфазную уравновешенную систему, то оптимальный сигнал коррекции равен

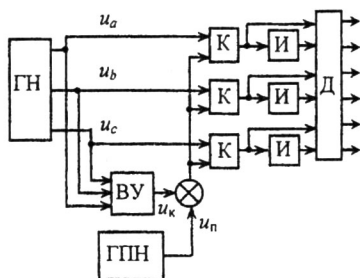


Рис. 16. Информационная часть ПЧ с коррекцией

$$u_{ко} = -\frac{3}{2} \frac{u_a \cdot u_b \cdot u_c}{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2}. \quad (6)$$

Информационная часть схемы ПЧ с сигналом коррекции показана на рис. 16, где вычислительное устройство ВУ формирует требуемый сигнал коррекции u_k , который добавляется к пилообразному напряжению.

Расширение области линейности выходного напряжения ПЧ с минимумом мощности потерь в нагрузке, возможно по следующему алгоритму.

1. Формируется сигнал коррекции \bar{u}_k по формуле (5).
2. Вырабатываются сигналы $u_{ак} = u_a + \bar{u}_k$; $u_{бк} = u_b + \bar{u}_k$; $u_{ск} = u_c + \bar{u}_k$.
3. Вырабатываются сигналы $u_{\max} = \max(u_{ак}, u_{бк}, u_{ск})$; $u_{\min} = \min(u_{ак}, u_{бк}, u_{ск})$.
4. Если $u_{\max} > U_{пм}$, формируется сигнал разности $u_{раз} = u_{\max} - U_{пм}$; если $u_{\min} < -U_{пм}$, формируется сигнал суммы $u_{раз} = u_{\min} + U_{пм}$, иначе $u_{раз} = 0$.

5. Вырабатывается сигнал коррекции $u_k = \bar{u}_k - u_{\text{раз}}$.

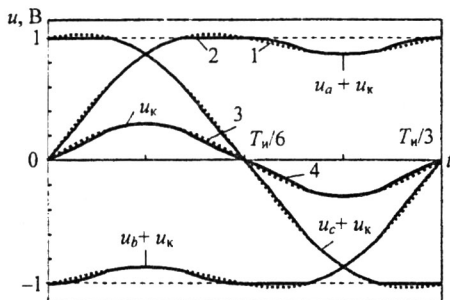


Рис. 17. Суммарные трехфазные сигналы и сигнал коррекции без и с сохранением области линейности ПЧ

На рис. 17 при $U_{3m} = 2/\sqrt{3} U_{\text{пл}}$ показаны сигналы: 1, 2 — суммарные сигналы при сигнале коррекции, без сохранения и с сохранением максимальной линейной зоны выходного напряжения; 3, 4 — сигналы коррекции, без и с сохранением максимальной линейной зоны выходного напряжения. Сигнал коррекции 4 на каждом его полупериоде имеет три части: центральную часть, которая совпадает с оптимальной коррекцией (5), левую и правую части, которые смещены

в сторону уменьшения их модуля.

Потери в стали от вихревых токов и на гистерезис при ШИМ вызываются переменными составляющими напряжений на фазах

$$\tilde{u}_A = \bar{u}_A - u_A; \tilde{u}_B = \bar{u}_B - u_B; \tilde{u}_C = \bar{u}_C - u_C.$$

Было найдено, что потери от вихревых токов связаны с их действующими значениями, а потери на гистерезис — с их средними значениями. Из рис. 18 (где $f_1 < f_2 < f_3 < f_4$) видно, что мощность потерь от гистерезиса имеет минимум при коррекции потенциала нейтрали по формуле (5). С увеличением частоты ШИМ уменьшаются амплитуды переменных составляющих токов фаз, в результате петли гистерезиса станут малыми, и мощность потерь от них уменьшается. Показано, что потери от вихревых токов не зависят от коррекции и от частоты ШИМ.

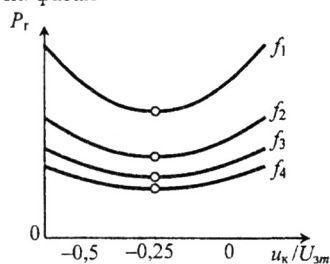


Рис. 18. Мощность потерь от гистерезиса

Показано, что мощность потерь переключения в элементах ПЧ не зависит от сигнала коррекции. Была найдена формула для расчета мощности потерь проводимости в силовых элементах (здесь — IGBT-транзисторы) ПЧ с коррекцией при синусоидальных токах нагрузки

$$P_{\text{п}} = 6 \left(\frac{I_m}{2\pi} (U_T + U_D) + \frac{I_m}{4\pi} (U_T - U_D) m \frac{\pi \cos \varphi}{2} + \frac{I_m^2}{8} (R_T + R_D) + \frac{I_m^2}{4\pi} (R_T - R_D) m \frac{4 \cos \varphi}{3} - \frac{I_m^2}{2\pi} (R_T - R_D) m_k \frac{4 \cos(3\varphi)}{15} \right),$$

где U_T , U_D — пороговые напряжения IGBT-транзистора и диода; R_T и R_D — их дифференциальные сопротивления; m — коэффициент модуляции; m_k — коэффи-

циент модуляции коррекции; ϕ – фазовый угол сдвига между напряжением и током; I_m – амплитуда тока нагрузки.

В шестой главе приводится описание разработанного на кафедре Электрооборудования с участием автора макета ПЧ, на базе которого проводилась практическая реализация ШИМ по критерию минимума мощности потерь в активно-индуктивной нагрузке, проверена достоверность математических моделей и разработанных алгоритмов поиска оптимального сигнала коррекции численным методом. В макете использованы IGBT транзисторы с обратными диодами типа M2TKI-50-12, драйвер IR2130, микроконтроллер dsPIC30F3010, который способен, в зависимости от программы, на формирование любых трехфазных сигналов ШИМ.

На рис. 19 представлены белым цветом измеряемый ток фазы A при активно-индуктивной нагрузке ($R = 10$ Ом и $L = 80$ мГ), а черным цветом – результат моделирования в момент времени $T_n/4$ с различными сигналами коррекции.

Видно, что при оптимальном сигнале коррекции (см. рис. 21, г) частота пульсации удваивается, а амплитуда в два раза уменьшается, т.е. мощность потерь от пульсации тока в четыре раза уменьшилась сравнительно с той же мощностью без коррекции. Результаты моделирования точно совпадают с экспериментальными результатами. Сдвиг между сигналами специально введен для удобства их визуального сравнения.

На рис. 20 показаны теоретический оптимальный сигнал коррекции жирной линией и экспериментальные сигналы коррекции кружками, их совпадение подтверждает формулу (5).

Был проведен эксперимент с асинхронным двигателем мощностью $P = 570$ Вт типа АИР63А2У3. Получено, что при его питании от ПЧ мощность потерь в нем от пульсации токов также имеет минимум при оптимальной коррекции.

На рис. 21 показаны результаты исследования зависимости общего тока системы "ПЧ – асинхронный двигатель" от частоты ШИМ, где 1, 2 – экспериментальные зависимости без коррекции, без и с аппроксимацией; 3, 4 – экспериментальные зависимости с оптимальной коррекцией, без и с аппроксимацией по формуле

$$I_0 = a + b \cdot f + c / f.$$

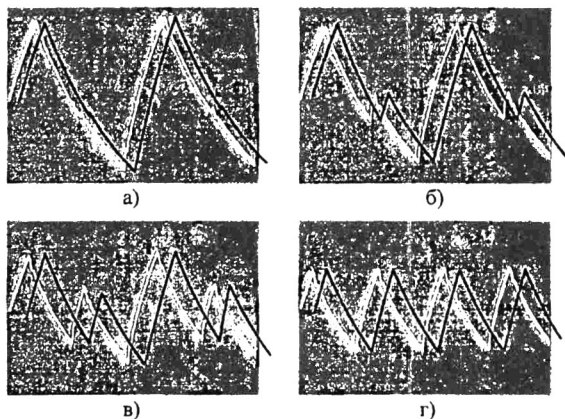


Рис. 19. Токи фазы A при разных сигналах коррекции в момент времени $t = T_n/4$

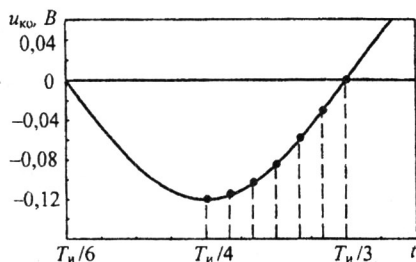


Рис. 20. Теоретический и экспериментальный оптимальные сигналы коррекции

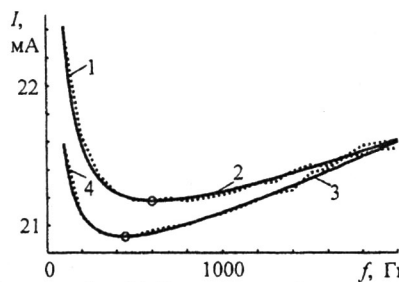


Рис. 21. Зависимость общего тока источника от частоты ШИМ

Видно, что для системы "ПЧ-двигатель" существует оптимальная частота ШИМ, при которой мощность потерь в системе минимальна. Она зависит от способа формирования ШИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

1. Разработаны алгоритмы оптимального управления электроприводом с двигателем постоянного тока с постоянным магнитом при разных условиях их работы в системах периодического движения по критериям минимума мощности потерь в обмотке двигателя и минимума потребляемой мощности от сети. Показано, что эти минимумы достигаются при разных законах управления.

2. Для поиска оптимального управления электроприводом с двигателем постоянного тока независимого возбуждения с учетом и без учета нелинейности магнитопровода по критерию минимума мощности потерь в обмотках двигателя целесообразно решать задачу в два этапа. На первом этапе нужно определить оптимальное соотношение токов якоря и возбуждения, создающих требуемый электромагнитный момент, затем решать задачу оптимального управления с помощью принципа максимума Л.С. Понтрягина в сочетании с численными методами, где сигналом управления является электромагнитный момент.

3. При разработке функциональных схем устройств идентификации параметров моментного двигателя, двигателя постоянного тока и синхронного двигателя целесообразно использовать непрерывный градиентный метод минимизации функций от невязок для уравнений двигателей.

4. Разработана функциональная схема усилителя неуравновешенной системы напряжений с расширенной зоной линейности выходных напряжений. Рекомендуется регулировать потенциал нейтрали трехфазной нагрузки для симметричного расположения максимального и минимального потенциалов ее зажимов относительно потенциалов источника постоянного напряжения.

5. Предложен метод и формула управления потенциалом нейтрали для минимизации мощности потерь в трехфазной нагрузке с изолированной нейтра-

лю по первой гармонике на частоте ШИМ. Показано, что с коррекцией мощность потерь снизится на 48% сравнительно с постоянным потенциалом нейтрали.

6. Предложен способ и формулы для модификации синусоидальной ШИМ путем управления потенциалом нейтрали по результирующему току для минимизации мощности потерь в нагрузке от пульсации токов. Показано, что с коррекцией мощность потерь снизится на 33% сравнительно с постоянным потенциалом нейтрали. При произвольной уравновешенной системе напряжений целесообразно использовать формулу коррекции по их мгновенным значениям.

7. При моделировании работы преобразователя частоты с целью поиска оптимального сигнала коррекции и повышения точности решения системы дифференциальных уравнений целесообразно применить численный метод Рунге-Кутты с целым числом шагов интегрирования на интервале постоянной структуры системы.

8. Показано, что мощность потерь в стали нагрузки от гистерезиса на частоте ШИМ имеет минимум при оптимальной коррекции потенциала нейтрали по условию минимума электрических потерь.

9. Предложены формулы для расчета мощности потерь проводимости и переключения в силовых ключах преобразователя частоты при его работе с коррекцией, которые целесообразно использовать при поиске оптимальной частоты модуляции.

10. Зависимость суммарной мощности, потребляемой преобразователем частоты и нагрузкой от источника питания, от частоты коммутации силовых ключей преобразователя рекомендуется аппроксимировать суммой линейной функции и гиперболы, что позволяет легко найти оптимальную частоту коммутации.

11. В лабораторных условиях реализован экспериментальный образец преобразователя частоты и на его базе опробован алгоритм оптимального управления потенциалом нейтрали при питании активно-индуктивной нагрузки и асинхронного двигателя. Экспериментально подтверждена принципиальная правильность разработанных алгоритмов моделирования работы преобразователя частоты с ШИМ и точность результатов оптимизации, полученных численными методами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК МОиН РФ

1. Собх М.И. Синтез оптимального управления моментным двигателем в си-
сте-ме сканирования // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева.– Казань: Изд-во КГТУ
им. А.Н. Туполева – 2009.– № 1.– С. 40 – 43.
2. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Преобразование постоянного напряжения в пе-
ременное с минимумом мощности потерь в трехфазной обмотке двигателя с
изолированной нейтралью // Журнал «Известия вузов. Проблемы энергетики»
Казань. Изд-во КГЭУ – 2010.– № 3–4.– С. 102 – 112.

3. Собх М.И. Преобразователи напряжения в электронных системах зажигания автомобилей // Сб. V Междун. н/п конф. «Автомобиль и техносфера», Казань, 28-30 ноября 2007 г. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 227.
4. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Система сканирования с комбинированным управлением и моментным двигателем // Сб. матер. XX Всерос. межвуз. н/т конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Часть 1. – Казань, 13-15 мая 2008 г. – Казань: Изд-во Отечества, 2008. – С. 277 – 278.
5. Собх М.И. Оптимальная программа движения сканирующего электропривода с моментным двигателем // Сб. матер. междунар. н/п конф. «Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения». – Казань, 12-15 августа 2008 г. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 123 – 127.
6. Собх М.И. Оптимизация размеров моментного двигателя для системы сканирования // Сб. Матер. междунар. н/п конф. – том 2 «Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения». – Казань, 12-15 августа 2008 г. – Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. – С. 128 – 133.
7. Собх М.И. Оптимальное управление моментным двигателем в системе сканирования // Сб. матер. Всерос. семинара «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением». – Казань, 11-12 ноября 2008 г. – Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. – С. 128 – 133.
8. Собх М.И. Электропривод постоянного тока периодического движения с минимизацией мощности потерь // IX Междунар. симпозиум «энергоресурсоэффективность и энергосбережение» – Казань, 2 – 4 декабря 2008 г. – Казань: Издательство «АтрПечатьСервис», 2008. – С. 224 – 230.
9. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Устройство оценивания параметров электродвигателя. Патент РФ № 2366070 С1, МПК H02P 7/06. БЮЛ № 24, 2009.
10. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Управление преобразователем частоты по критерию минимума мощности потерь в нагрузке // Сб. матер. V Всерос. н/т конф. «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики», том 2, 12 – 13 октября 2009 г. – Казань: Изд-во Кзан. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 3 – 10.
11. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление в системе сканирования с моментом двигателем сухого трения по критерию минимума потребляемой от сети мощности // Сб. матер. II Всерос. н/т конф., том 1, 19 – 20 марта 2009 г. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – С. 41 – 43.
12. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Основные вопросы синтеза преобразователей частоты // Сб. матер. XXI Всерос. межвуз. н/т конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материа-

лов и изделий», часть 1, 12 – 14 мая 2009 г.– Казань: Изд-во Отечество, 2009.– С. 79 – 81.

13. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Преобразователь частоты с минимумом мощности потерь в трехфазной симметричной нагрузке с изолированной нейтралью// XXXIX междунар. н/п конф. «повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений». Москва, МЭИ, 16 – 20 ноября 2009 г.– том 2.– М.: Технетика, 2009.– С. 144 – 145.

14. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Минимизация мощности потерь в стали от широтно-импульсной модуляции//X междунар. симпозиум «энергоресурсоэффективность и энергосбережение», Казань, 1-3 декабря 2009 г.– часть 2.– Казань: Издательство Печатный салон «Онегин», 2008.– С. 410 – 418.

15. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Трехфазный усилитель. Патент РФ № 2382482 С1, МПК H03F 3/217. БЮЛ. № 5, 2010.

16. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление двигателем постоянного тока с независимым возбуждением без учета нелинейности кривой намагничивания по критерию энергосбережения // Сб. матер. XXII Всерос. межвуз. н/т конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», часть 1, 17 – 19 мая 2010 г.– Казань: Изд-во Отечество, 2010.– С. 95 – 97.

17. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление двигателем постоянного тока с независимым возбуждением с учетом нелинейности кривой намагничивания по критерию энергосбережения //Сб. матер. XXII Всерос. межвуз. н/т конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», часть 1, 17 – 19 мая 2010 г.– Казань: Изд-во Отечество, 2010.– С. 97 – 99.

18. Собх М.И., Афанасьев А.Ю., Экспериментальное исследование преобразователя частоты с минимумом мощности потерь в трехфазной нагрузке// Мат. межвуз. рег. Студ. н/п конф. «Новые направления и современные тенденции развития автоматизированных систем управления», 20 апреля 2010 г.– Нижнекамск: Нижнекам. химико-технолог. инст.(филиал) КГТУ, 2010.– С. 9 – 13.

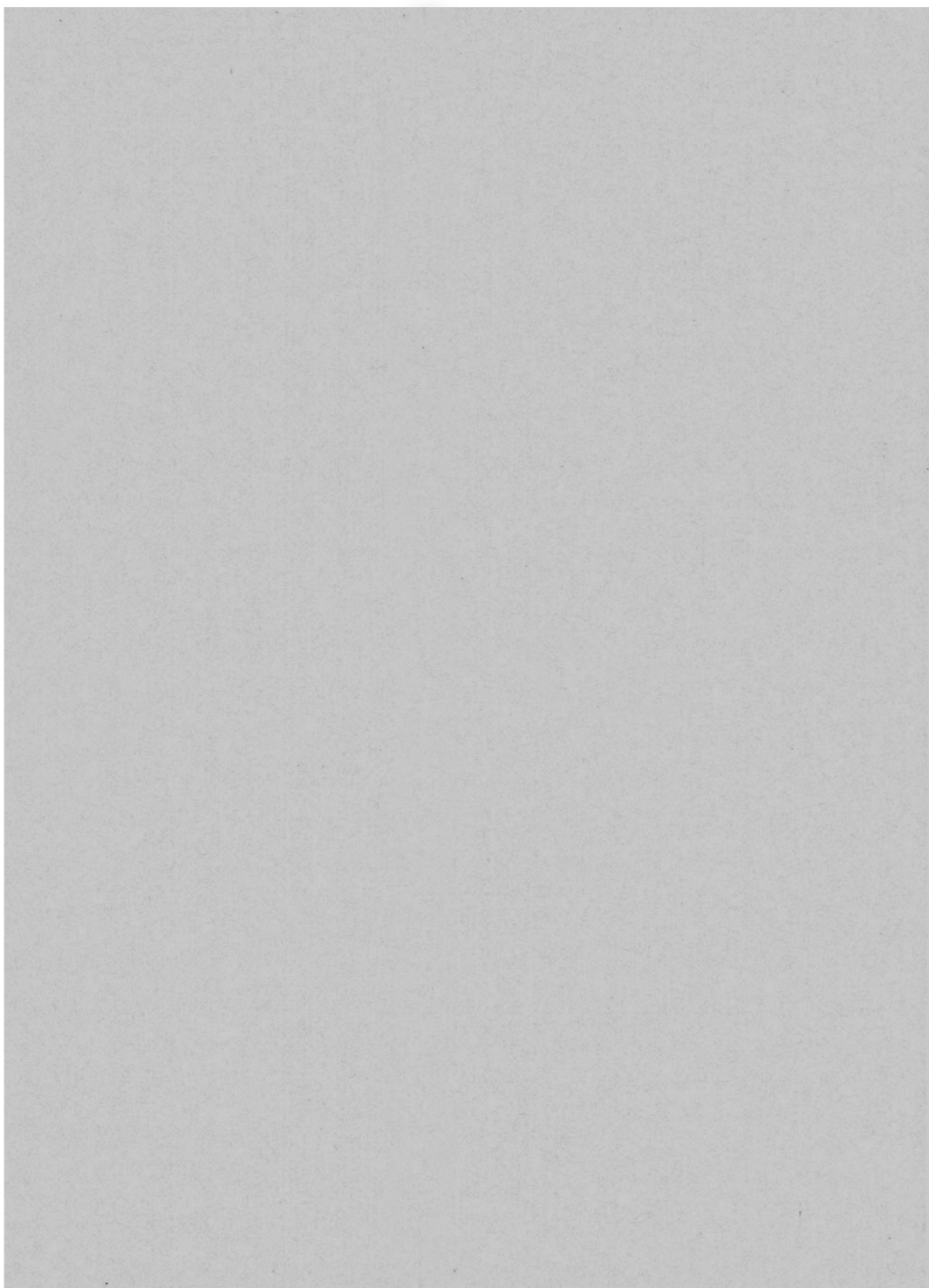
19. Собх М.И., Афанасьев А.Ю. Мощность потерь силовых полупроводников преобразователя частоты// Всерос. н/п конф. «Проблемы перехода к устойчивому развитию монопрофильных городов», 23 апреля 2010 г.– Нижнекамск: Изд-во Казан. Гос. Техн. ун-та, 2010. С. 93 – 96.

20. Собх М.И., Джавир М.Ф. Мощность потерь в мостовой схеме преобразователя постоянного тока// Междунар. молодеж. науч. конф. «XVIII Туполевские чтения» .», 26-28 мая 2010 г.– Том V.– Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева С. 215 – 217.

21. Собх М.И., Давыдов Н.В. Экспериментальное исследование преобразователя частоты по минимуму мощности потерь в трехфазной нагрузке// Междунар. молодеж. науч. конф. «XVIII Туполевские чтения» .», 26-28 мая 2010 г.– Том V.– Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева – 2009. С. 217 – 219.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ.л. 1,25. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,07.
Тираж 120. Заказ Н 157.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111 Казань, К. Маркса, 10



102